

## 금정산 풍하측 저고도의 강풍 현상

임상진 · 서광수 · 진병화 · 김해동 · 황수진  
부산대학교 지구과학과  
(1996년 10월 1일 접수)

### On the Low Level Strong Wind Occurring at the Downwind Side of the Kumjeong Mountain.

Sang-Jin Lim, Kwang-Su Seo, Byong-Hwa Jin, Hae-Dong Kim and Soo-Jin Hwang  
Dept. of Earth Science, Pusan National University, Pusan, Korea  
(Manuscript received 1 October 1996)

We identified two characteristic turbulent flow cases, weakening and strengthening, which appear at the downwind side. Observations were made two times, Dec. 2-3, 1995 and Feb. 13-14, 1996 at Pusan National University site located downwind side of Kumjeong mountain. Meteorological observation system, tethersonde, was adopted to present observation. In the case of the west wind which blows perpendicular to Sanghak mountain located westward from the site, the wind speed highly increased in exponential with height. Therefore, the low level wind speed was so weak just like Taylor(1988)'s review. While the wind speed was intensified at 200-400m layer when the northwest wind blows from the continental Siberian high. We suppose it is because of the strong vertical convergence of flow between the surface inversion layer and the upper one, and also the horizontal convergence along the saddle and valley between the two mountains, Kumjeong and Sanghak-because of Bernoulli's effect. The inversion layer existed at surface-100m and 500-600m level and the strong wind existed at about 200-400m layer.

**Key Words:**Downwind, low level strong wind, Turbulent flow

#### 1. 서 론

산을 넘는 기류에 의해 만들어지는 대기 순환은 행성 규모로부터 아주 작은 미소 규모의 요란까지 다양하게 나타난다. 이러한 요란의 규모 및 형태에 영향을 주는 대표적 인자들에겐 장애물의 크기와 모양, 바람 그리고 연직 안정도 등이 있다(Atkinson, 1981).

장애물의 영향에 대한 흐름의 형태를 예측하는 매개 변수는 부력진동수, 산의 특성 길이 규모(half-width), 풍상측의 평균 풍속 등의 함수로 표현되는 Froude 수를 사용할 수 있다(Kaimal and Finnigan, 1994).

Forchgott(1949)는 산을 넘는 기류의 형태에 따라 laminar, standing eddy, wave, rotor

streaming 등의 4가지로 분류하였으며, Wallington(1960)은 Lee wave의 관측적 특징 및 이와 연관된 바람과 온도 구조에 관하여 연구한 바 있다.

풍하측 기류에 관한 이론적 연구 사례 중에서 기류의 진폭이 작은 경우에는 선형이론을 적용하였는데, 선형 이론으로 연구한 사례는 Lyra(1940; 1943), Queney(1941; 1947; 1948) 등의 정적 안정 공기의 흐름에 대한 내부 중력파(internal gravity wave), Corby와 Sawyer(1958a), Sawyer(1960) 등의 다층모형이 있다. 반면 진폭이 큰 흐름에 대해서는 Hovermale(1965), Peltoer와 Clark(1979) 등은 비선형이론을 적용하기도 하였다.

한편 실험실 실험결과에 의거한 수치 모의 실험은 Long(1953a; 1953b; 1954; 1955; 1959)에 의해서, 풍동실험은 Yamada와 Meroney (1974)에 의해서 수행되었다.

이와 같이 산악지역의 풍하측 기후의 특성을 포함한 저고도 바람에 관해서 관측, 이론 그리고 수치적인 방법으로 연구가 진행되어 오고 있다.

우리나라의 경우 최근에 항공 교통량이 증가 되고 저고도 항공기 사고 사례가 빈번하다. 따라서 산후사면의 난기류에 대한 관측 내지는 예측이 절실이 요구되고 있지만 이에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 겨울철 북서 계절풍이 내습할 때 금정산 풍하측에서 나타나는 저고도 기류의 특성을 파악하기 위하여 실시되었다.

## 2. 재료 및 방법

풍하측에서 나타나는 저고도 기류의 특성을 파악하기 위해서는 계류기구를 사용한 관측이 필요하다. Fig. 1은 관측을 실시한 부산대학교 구운동장 주변의 지형도를 나타낸 것이다. 부산대학교를 중심으로 북북동에서 남남서 방향의 동태 단층이 형성되어 있다. 그리고 북북서 방향으로 금정산(805m), 서쪽으로는 상학산(638m)이 있으며, 그 사이에 안장모양의 능선인 산성고개가 있다. 이 고개는 관측 장소의 북서 방향에 위치한다.

관측 장비는 미국 Atmospheric Instrument

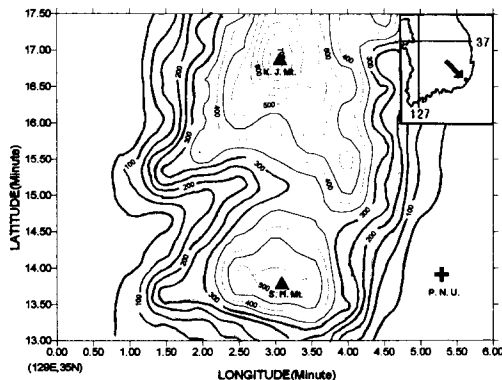


Fig.1. Geographical map around Pusan National University.  
K.J.Mt. : Kumjeong Mountains,  
S.H.Mt. : Sanghak Mountains,  
P.N.U. : Pusan National University.

Table 1. Observation time and maximum balloon height for case 1(Feb. 13-14, 1996)

run No.	starting time (LST)	running time (minute)	maximum balloon height (In meter)
P13U1	20:10	19' 32"	510
P13U2	22:00	14' 30"	490
P14U3	00:00	19' 42"	610
P14U4	03:00	17' 45"	600
P14U5	05:00	19' 21"	640
P14U6	06:00	17' 41"	620
P14U7	07:00	17' 46"	600

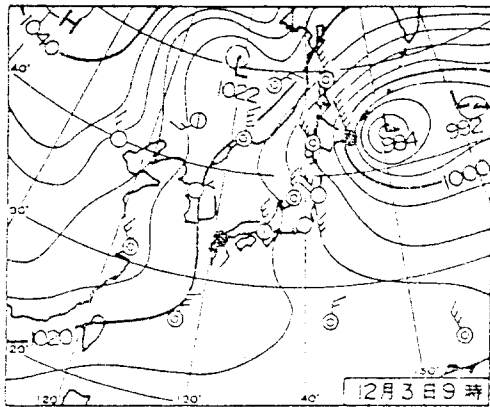
Table 2. Observation time and maximum balloon height for case 2(Dec. 2-3, 1995)

run No.	starting time (LST)	running time (minute)	maximum balloon height (In meter)
P12U1	23:16	7' 56"	320
P12U2	00:27	10' 21"	440
P12U3	01:30	6' 12"	230
P12U4	02:22	7' 10"	260
P12U5	03:19	9' 42"	320
P12U6	03:37	8' 15"	280
P12U7	05:04	27' 54"	970
P12U8	06:03	8' 12"	360
P12U9	07:02	26' 18"	840

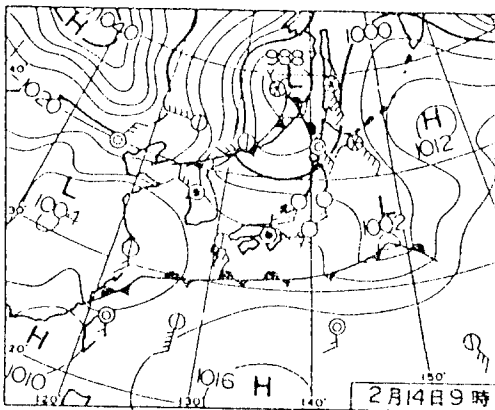
Reserch Co.의 ADAS-3B형 Tethersonde를 사용하였다. 관측 요소는 고도별 기압, 건습구 온도, 풍향, 풍속, 상대습도인데, 관측 센서를 계류기구 (balloon)에 매달고 상승 또는 하강하면서 감지한 기상 요소를 ADAS 출력치로 얻고, 이를 PC에 연결하여 기록하게 하였다. Tethersonde 풍선의 상승 및 하강은 전력으로 구동되는 Winch를 이용하여 Tether-line을 1 m/s로 풀리거나 되감게 하였다.

관측은 서풍이 주로 불어 온 1996년 2월 13일 21시에서 14일 07시 까지(사례 1)와 북서풍이 우세한 1995년 12월 2일 20시에서 3일 09시 까지(사례2) 2회를 실시하였다(Table 1, Table 2).

Fig. 2a는 사례2 관측기간 중인 1995년 12월 3일 09시의 지상 일기도이다. 이 날은 우리나라가 시베리아 고기압의 장출 전면에 위치한 전형적인 겨울철 기압배치로서 북서풍이 유입되는 가운데 맑은 날씨를 보였다. Fig. 2b는 사례 1 관측기간 중 1996년 2월 14일 09시의 지상 일



(a)



(b)

Fig.2. Synoptic surface weather chart (a) at 09:00 LST December 3, 1995 and (b) at 09:00

기도로서 북쪽의 한랭전선과 남쪽의 정체전선 사이에 위치하면 부산지역 풍향은 서풍이 유입 되는 가운데 대체로 맑은 날씨를 보였다.

### 3. 결 과

Tethersonde를 이용하여 관측한 기압을 고도로 환산하기 위하여 다음 (1)식과 같은 층후 공식을 이용하였다.

$$z_i = z_{i-1} + \frac{R}{g} \frac{T_v + T_v}{2} \ln \frac{p_{i-1}}{p_i} \quad (1)$$

여기서  $z, R, g, p$  는 각각 고도, 기체상수, 중력가속도, 기압이다. 그리고  $T_v$  는 혼합비( $w$ )의 함수로 표현되는 가운데로서 아래 (2) 식과 같다.

$$T_v = T(1+0.61w) \quad (2)$$

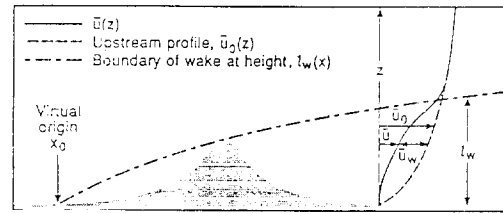
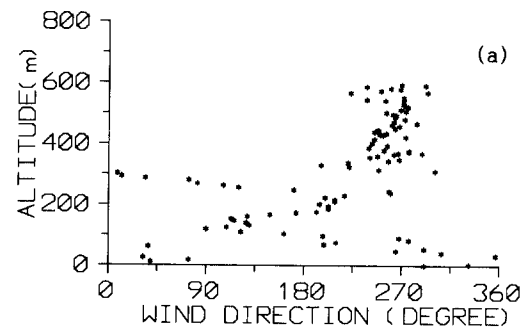
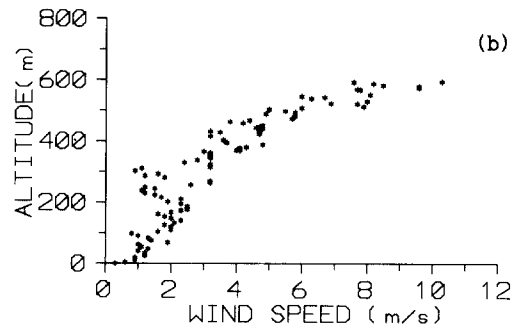


Fig.3. Schematic illustration of the vertical wind speed profile,  $l_w$  indicates wake depth (after Taylor, 1988).



(a)



(b)

Fig.4. Vertical profiles of wind direction and wind speed for case 1(07:00 LST Feb. 14, 1996). (a) Wind direction, (b) Wind speed.

#### 3. 1 사례1(1996년 2월 14일 07시)

산악의 주능선에 수직 방향으로 불어오는 수평적으로 균일한 바람은 산 후사면에 와류나 심한 난류를 형성시킨다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 풍상측에서의 고도별 풍속 분포는 파선과 같이 대수분포를 보이지만, 풍하측에서는 실선과 같은 지수 분포를 보여 산악에 의한 풍속의 감쇄 현상이 뚜렷하다(Taylor, 1988).

본 관측의 경우 서풍이 불어올 때 풍향과 상학산 주위의 주능선은 수직 관계에 있으므로 Fig.

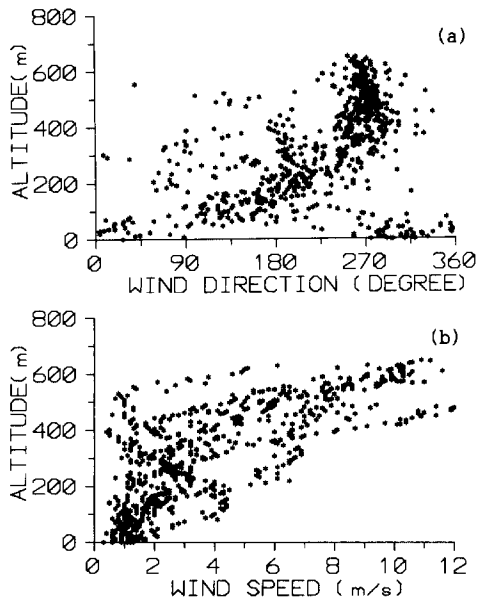


Fig.5. Same as Fig.4 but for summation of 7 observed data during Feb. 13-14 1996.

3에서 제시한 바와 같이 풍상측에 비하여 풍속의 현저한 감소 현상이 기대된다. Fig. 4는 관측한 것 중에서 대표적인 14일 07시의 풍향과 풍속을 제시한 것이다.

먼저 Fig. 4의 (a)는 고도별 풍향 분포를 나타낸 것이다. 400m 이하의 고도에서 나타나는 불규칙한 풍향 분포는 산악 효과에 의해 산 후사면에서 발생하는 난류로 해석된다. 그러나 400m 이상의 고도에서는 서풍(270°)이 탁월한 것으로 보아 중관규모의 주 바람장이 서풍임을 알 수 있다.

Fig. 4의 (b)는 고도별 풍속의 분포를 나타낸 것으로 지표 부근에서는 고도에 따른 풍속의 증가가 작지만 고도가 증가할수록 풍속 증가율이 크게 나타나 Fig. 3에서 제시한 지수분포를 뚜렷이 나타내었다.

Fig. 5의 (a), (b)는 각각 풍향과 풍속의 고도 분포를 나타낸 것으로 야간 관측한 7회를 모두 종합한 것인데 전반적으로 Fig. 4의 (a)와 (b)에서 나타난 특징과 거의 같다.

### 3.2 사례 2 (1995년 12월 2~3일)

독립된 산악을 넘는 기류가 산 후사면에서 사례 1과 같이 현저한 풍속의 감소와 더불어 난류 현상을 초래하는 반면 지형이 계곡이나 안장형

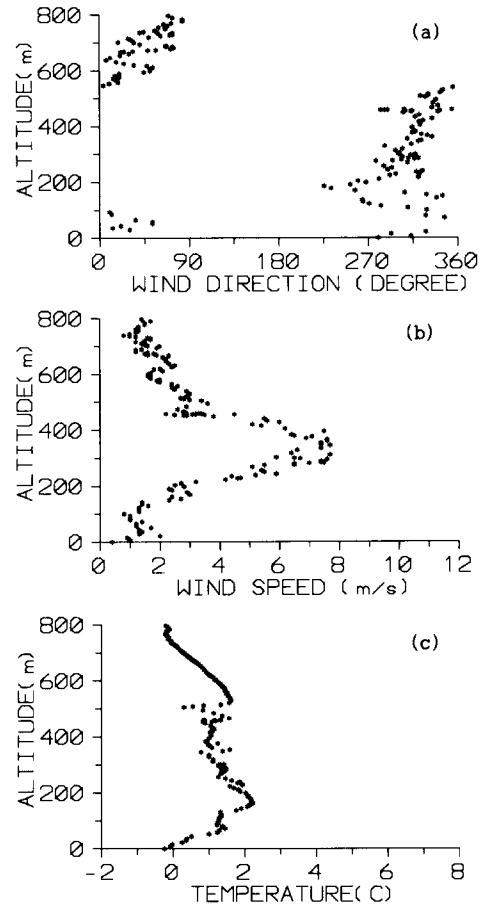


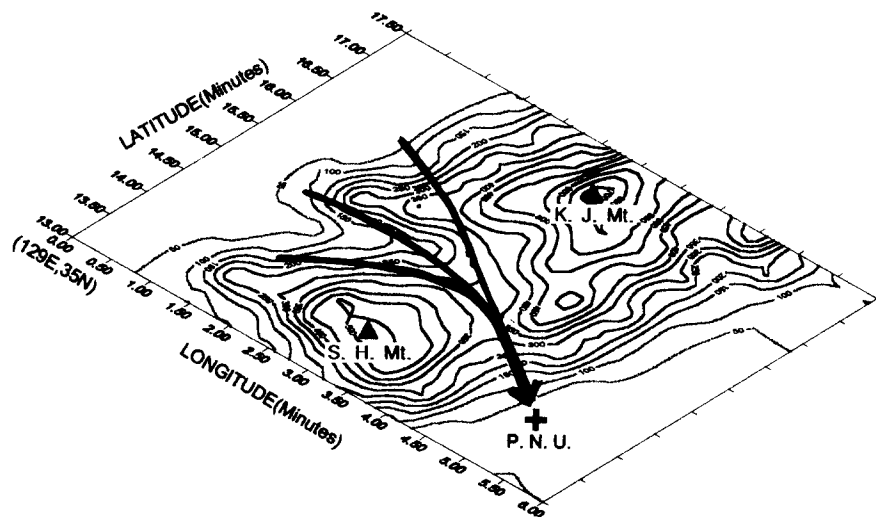
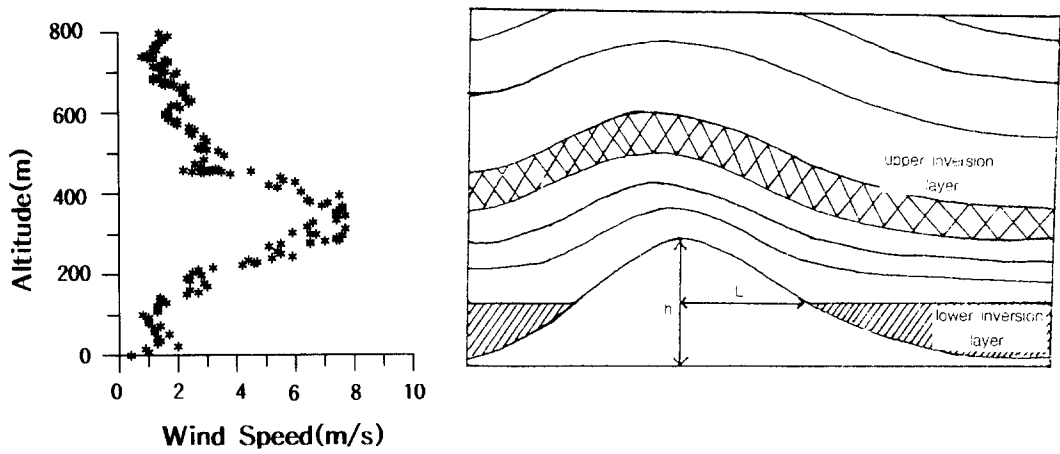
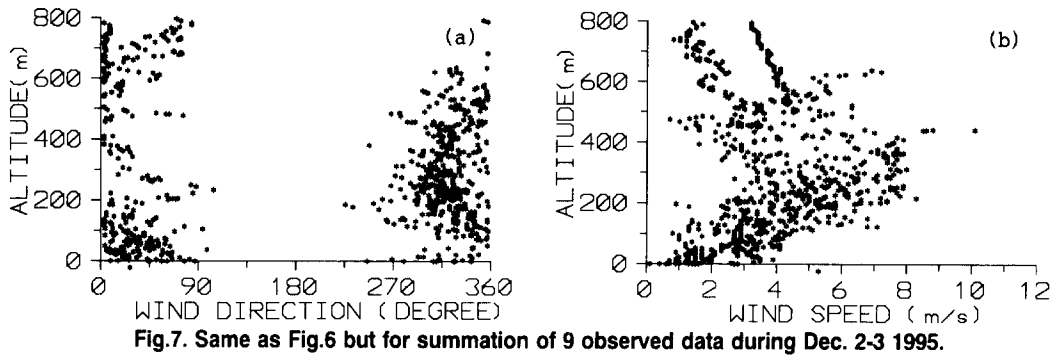
Fig.6. Vertical profiles of wind direction, wind speed and temperature. for case 2(07:00 LST Dec.3. 1995). (a) Wind direction, (b) Wind speed, (c) Temperature.

의 능선을 이룰 경우 기류의 흐름은 베르누이 효과-유체가 폐관내를 흐를 때, 폭이 좁아지면 유속이 빨라지고 폭이 넓어지면 유속이 느려지는 효과-에 의해 풍속이 증가될 수 있다. Fig. 1에서 부산대학교(관측 장소)의 북서 방향으로 금정산과 상학산 사이에 안장형의 능선이 있을뿐만 아니라 이에 연결된 골짜기가 부산대학교 방향으로 형성되어 있다. 따라서 베르누이 효과에 의한 풍속의 증가 현상이 기대된다.

Fig. 6은 시베리아 기단이 장출할 때인 1995년 12월 3일 07시의 관측 결과로 고도별 풍향, 풍속, 기온의 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 6의 (a)는 연직 풍향 분포를 나타낸 것으로 200~500m 고도에서 북서풍이 탁월하게 나타나고 있다. Fig. 6의 (b)는 고도별 풍속의 분포

금정산 풍하측 저고도의 강풍 현상



를 나타낸 것으로 300m 내외의 고도에서 최대 풍속을 보인다. Fig. 6의 (c)는 연직 기온 구조를 나타낸 것으로 지표면에서 200m 고도 사이에 강한 접지 역전층이 형성되어 있으며, 또 다른 역전층이 500~600m 고도에 존재하여 결국 200~500m 고도는 두 개의 안정한 역전층 사이에 놓이게 된다.

Fig. 7의 (a)는 1995년 12월 2일에서 3일 사이 관측한 9회를 종합하여 나타낸 것으로 풍향은 200~500m 사이 고도에서 북서풍이 우세함을 알 수 있다. 지표면의 북풍 내지 북동풍은 동태 단층을 따라 밀도류가 바다로 흐르고 있기 때문으로 생각된다. Fig. 7의 (b)에서 최대 풍속은 200~400m 고도 사이에서 나타났다.

사례 2에서 나타난 저고도 강풍층의 생성원인을 유추해 보면 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 연직적, 수평적으로 공기가 수렴함으로써 풍속이 강화된 베르누이 효과로 해석된다. Fig. 8은 연직적 관점에서 본 모식도인데, 상층에 역전층이 존재할 때 풍상측에 비하여 풍하측에서 역전층 하부층의 유선이 훨씬 더 좁아지는 사실을 볼 수 있다. 따라서 풍하측의 접지 역전층과 상부 역전층 사이의 고도에서 풍속이 강화된다는 것을 알 수 있다. 한편 안정층에 의하여 부력이 억제된 공기층의 일부는 고도가 낮은 능선과 계곡을 따라 수렴할 수 있다. 이러한 상황을 Fig. 9에 모식적으로 나타내었다.

#### 4. 결론 및 토의

금정산 풍하측(부산대학교)에서 계류 기구를 이용하여 고도별 풍향, 풍속 및 기온을 2회 관측(1995년 12월 2-3일, 1996년 2월 13-14일)한 결과 두 경우의 특징을 관측할 수 있었다. 먼저 서풍이 유입될 경우 Taylor(1988)가 지적한 바와 같이 상학산의 영향으로 풍하측의 저고도에서 풍속 감소 현상이 뚜렷하게 나타났다. 두 번째로 북서풍이 유입될 경우, 연직적으로는 지표면과 상층의 강한 안정층 사이에서 연직 수렴이 유도되었고, 수평적으로는 지형이 안장 모양의 능선과 계곡을 따라 베르누이 효과에 의하여 수렴이 유도되어 저고도에서 풍속이 강화되었다.

풍하측의 역전층은 지표에서 200m 고도와 500-600m 고도에서 형성되었으며 강풍층은

200-400m 고도에 존재하였다. 이로서 지형적인 효과에 의하여 산악후면의 하층에서 강한 풍속대가 나타났음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구논문은 부산대학교 연구지원경비에 의하여 수행되었기에 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- Atkinson B. W., 1981, Meso-Scale Atmospheric Circulation, Academic Press, 25pp.
- Carruthers D. J. and T. W. Choularton, 1982, Airflow over hills of moderate slope, *Q. Jl. R. Met. Soc.*, 108, 603-624.
- Corby G. A. and Sawyer J. S., 1958a, The air flow over a ridge - the effects of the upper boundary and high level conditions, *Q. Jl. R. Met. Soc.*, 84, 25-37.
- Fö rchgtott J., 1949, Wave currents on the leeward side of mountain crests., *Meteorologicke Zpravy*, 3, 49-51.
- Kaimal J. C. and J. J. Finnigan, 1994, Atmospheric Boundary Layer Flows, Oxford University Press, 156pp.
- Queney P. A., 1948, The problem of air flow over mountains: summary of theoretical studies., *Bull. Am. Met. Soc.*, 29, 16-26.
- Sawyer J. S., 1960, Numerical calculation of the displacements of a stratified airstream crossing a ridge of small height, *Q. Jl. R. Met. Soc.*, 86, 326-345.
- Taylor P. A., 1988, Turbulent wakes in the atmospheric boundary layer. In flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications., Springer-Verlag, Berlin, 270-292.
- Wallington C. E., 1960, Introduction to lee waves in atmosphere, *Weather*, 15, 269-276.